

# CAMBIO DE USO DEL SUELO: LOS PROCESOS DE URBANIZACIÓN EN EL VALLE DE MÉXICO Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO

*Antonina Galván Fernández<sup>1</sup>*

*María Eva Guadarrama Brito<sup>2</sup>*

## RESUMEN

El cambio climático es un concepto asociado al uso del suelo y los patrones hidrológicos. Estos procesos son regidos por el relieve, que a su vez, es definido por los procesos terrestres que son lentos, pero se vuelven rápidos por la intervención humana. Esta redefinición del problema integra elementos no asociados al medio ambiente: los sociales.

El cambio del uso del suelo afecta los espacios naturales y rurales. El Global Forest Watch (GFW, 2013) indica que globalmente se han perdido más de 185, 850, 000, 000 m<sup>2</sup>, de cobertura vegetal; México perdió 1, 929, 410, 000 m<sup>2</sup>, en 2013, (Economista, 2017). El caso más representativo del país es la Zona Urbana del Valle de México (ZUVM).

La mancha urbana de la CVM alberga más de 23 millones de habitantes; ha crecido horizontal sobre terrenos agrícolas y de vegetación endémica, en el peor de los casos, en suelos desnudos que permitían el amortiguamiento de escurrimientos e infiltración. La pérdida de estos espacios ha redundado en inundaciones, las que generan la pérdida del patrimonio económico de pobladores, infraestructura, vivienda y salud pública. Por tanto, los impactos del cambio climático en la Ciudad de México son mayores en extensión e intensidad.

Los cambios en el uso del suelo se evalúan con modelos que responden a necesidades específicas de toma de decisión. Se piensa que la mancha urbana crece proporcional al cambio de uso de suelo; respecto de las inundaciones, se menciona que son producto de *lluvias atípicas* combinadas con el taponamiento del drenaje por basura. Sin embargo, no se han realizado evaluaciones rigurosas que permitan afirmar esto. Este trabajo relaciona las características del relieve terrestre con el crecimiento de la mancha urbana y los cambios de uso de suelo a partir del año 2000. El objetivo es identificar el vínculo entre los patrones de escurrimiento, y el uso del suelo.

**Palabras clave:** uso del suelo, inundaciones, crecimiento urbano

---

<sup>1</sup> Maestra en Ciencias, Universidad Autónoma Metropolitana, [loralaik@gmail.com](mailto:loralaik@gmail.com)

<sup>2</sup> Maestra en Ciencias, Universidad Autónoma Metropolitana, [mgb124@hotmail.com](mailto:mgb124@hotmail.com)

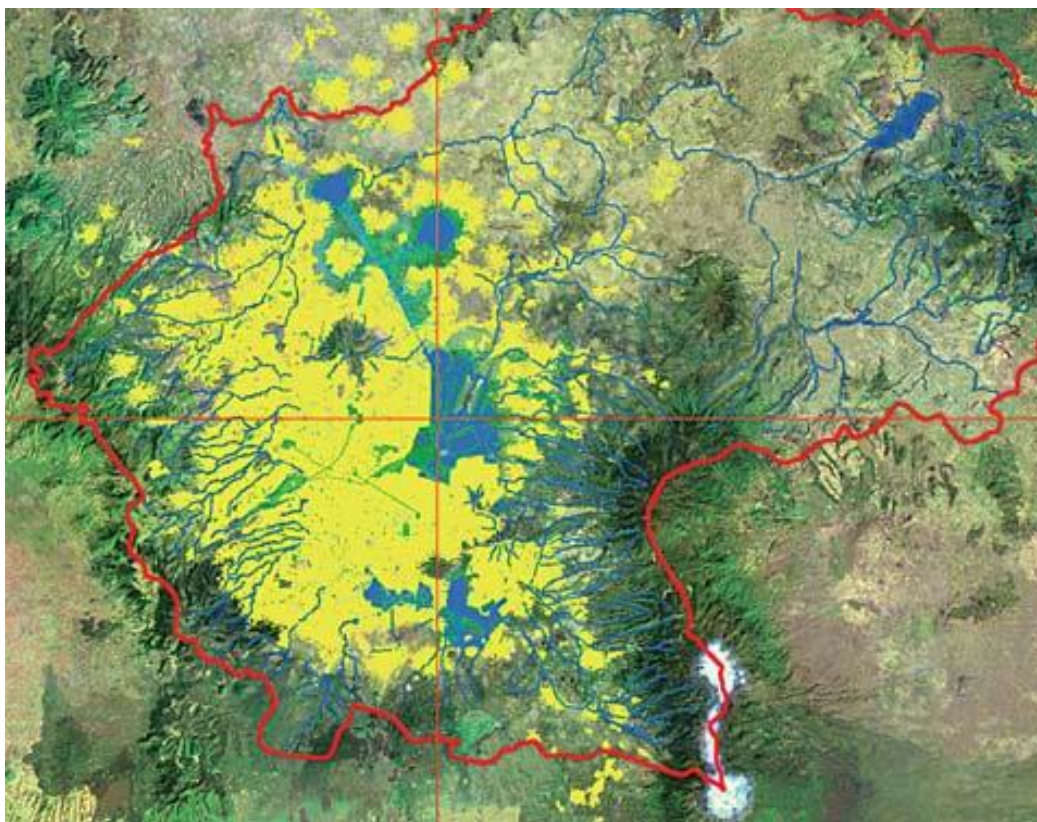
## **Introducción**

El cambio climático se entiende como el cambio atribuido directamente o indirectamente a la actividad humana, que altera el comportamiento de la atmósfera, incrementado la variabilidad natural del clima observada durante periodo de tiempos comparables (CINU, 2009). El cambio climático es un concepto asociado al uso del suelo, en particular, el cambio de los patrones hidrológicos. Los patrones hidrológicos son la forma en que se transfieren los volúmenes de agua de la atmósfera, hacia la superficie terrestre; estos procesos de transferencia son regidos por las características del relieve, y éste a su vez, es definido por los procesos terrestres que son lentos por definición, pero se vuelven rápidos por la intervención humana.

De acuerdo con el Land Use Change Forestry (LULUCF, 2009), la definición más reciente del cambio climático, ya no solo involucra los aspectos meteorológicos del ambiente, sino la totalidad de él, es decir: agua, suelo, vegetación y atmósfera. Esta redefinición del problema ha generado la necesidad de integrar aspectos del fenómeno no asociados al medio ambiente, los aspectos sociales. Es decir, que el clima engloba la totalidad de los procesos físicos, bióticos y abióticos que se presentan en una región dada y una de las consecuencias ocasionadas por el cambio climático es el cambio del uso del suelo; estos cambios afectan mayoritariamente a espacios naturales y rurales, además se considera factor fundamental de la pérdida de patrimonio ambiental alrededor del mundo, por tanto condiciona la pervivencia de cualquier comunidad, sobre todo en los países subdesarrollados.

De acuerdo al artículo 3 de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CINU, 2009) menciona que se deben adoptar medidas que protejan a los ecosistemas frente al cambio climático, para beneficio de las generaciones presentes y futuras. Para ello se debe prever, prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos, especialmente sobre los patrones hidrológicos. Por tal motivo el cambio climático y cambio de uso de suelo están íntimamente relacionados. El Global Forest Watch (GFW, 2013) indica que globalmente se han perdido más de 185, 850, 000, 000 m<sup>2</sup>, de cobertura vegetal; México perdió 1, 929, 410, 000 m<sup>2</sup>, en 2013, (Economista, 2017). El caso más representativo del país es la Zona Urbana del Valle de México (ZUVM).

La Cuenca del Valle de México (CVM) es una de las cuencas que más ha modificado su uso de suelo a nivel mundial; por ser una cuenca cerrada, en el fondo del valle se formaba un sistema lacustre compuesto por 5 lagos, que ha sido modificado drásticamente en su funcionamiento hidrológico desde épocas prehispánicas; a pesar de esto, aun cuenta con sistemas ambientales que se conservan y que conviven con áreas que han sido modificadas parcial o totalmente por intervención humana. A lo largo del siglo XX, los ríos que alimentaban los lagos fueron vistos como un riesgo sanitario, ya que en ellos se descargan los drenajes de asentamientos humanos. Con el tiempo se entubó la mayoría de estas corrientes, convirtiéndolos en parte del sistema de drenaje de la ciudad, y dar paso a la creación de zonas de desarrollo urbano y de inversión inmobiliaria. Actualmente los espacios conservados se ubican principalmente en las estribaciones de serranías, que generan escurrimientos que drenan hacia los antiguos lechos lagunares, al centro de la cuenca (Figura 1).



**Figura 1. Cuenca del Valle de México (Tomado de Cano, 2011)**

La CVM alberga más de 23 millones de habitantes registrados en el 2015 (Tabla 1), su crecimiento ha sido horizontal, invadiendo los terrenos aledaños a las zonas urbanas. Dichos terrenos albergaban zonas agrícolas o zonas de vegetación endémica y en el peor de los casos eran terrenos de suelos desnudos que permitían el amortiguamiento de los escurrimientos de la cuenca. La pérdida de estos espacios de control hidrológico ha redundado en impactos económicos y sociales derivados de inundaciones por escurrimientos, las que generan la pérdida de patrimonio económico de pobladores, infraestructura, vivienda y salud pública.

Por todo lo anterior, en las grandes ciudades el cambio climático es un fenómeno que abarca lo climático, donde es más importante la fracción asociada al uso y cambio de suelos; en este apartado hay un número mayor de factores que aportan a la problemática. En este documento se aborda la relación entre el cambio de suelo y el cambio de patrones hidrológicos.

### **Zona de estudio**

La CVM se localiza en la zona centro de la república mexicana en el cinturón volcánico Transmexicano con una extensión territorial de 7,954 km<sup>2</sup> aproximadamente. Está conformada por 105 municipios y tres entidades federativas (Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala) se encuentra en una altitud media de 2,420 msnm, se encuentra rodeada por montañas en la cuales se puede alcanzar los 5000 m, se encuentra en la región hidrológica administrativa XIII, esta región es de las más pobladas de las 13 regiones del país (CCVM, 2014).

La CVM es una formación geológica de la época del terciario que cruza la república mexicana del océano pacífico hacia el atlántico, la edafología predominante consiste en feozems, Litosoles y vertisoles (CCVM, 2014). La temperatura media es de 15 °C, anualmente la precipitación media anual se encuentra dentro de los 700 mm, la temporada de lluvia se encuentra dentro de los meses de junio a septiembre. Los tipos de climas principalmente son: Semiárido Templado, Semiárido Semicálido, Templado, Árido Semicálido, Árido Templado, Templado Húmedo, Templado Subhúmedo y Semifrío Subhúmedo de acuerdo a la clasificación de Köppen. Cuenta con una cobertura vegetal y usos de suelo muy variados, en la que destacan: Parques, zonas agrícolas (riego y temporal), Pastizales, Matorrales, áreas de producción rural y agroindustrial, áreas de conservación, áreas afectadas (Mancha Urbana), Áreas sin afectación (Reservas Naturales) y cuerpos de agua (Ecología, 2007).

La zona donde se producen los escurrimientos se ha denominado suelo de conservación; de acuerdo con la Dirección General del Medio Ambiente y Ecología, este constituye el 17% del territorio de la cuenca, y 41% es suelo urbano, de esto, el 3.5% son asentamientos irregulares y la zona de planicie representa el 15% y se encuentra ocupada por completo por el uso de suelo urbano. Este suelo está conformado por montañas y bosques con escurrimientos y manantiales, sobre un sistema de barrancas. (Fernández et al., 2000); sus montañas son principalmente de origen volcánico, por lo cual el sustrato es roca permeable la cual conduce a la infiltración de acuíferos. El relieve va de los 2, 500 msnm hasta los 3,700 msnm al extremo sur poniente; la zona de planicie representa el 15% del territorio y se encuentra por completo en el suelo urbano. La cuenca geomorfológicamente se divide en:

*Estructura volcánica:* Representa la totalidad de la Sierra Transversal o del Valle de México, que delimita la cuenca respecto a los Valles de Puebla, Tlaxcala y Toluca.

*Laderas Montañosas:* Conforman el cuerpo de escarpado y modelado de agente exógenos, presentando escarpes y fallas que controlan escurrimientos, generando amplias y profundas barrancas.

*Lomeríos:* Representan zonas con gran acción denudativa y aportan detritos y material de arrastre.

*Lomeríos bajos:* Formas erosionadas que se encuentran a menor altitud.

*Piedemonte de lomeríos:* De pendiente más suave, se encuentra una porción al oriente de la delegación y conforman la transición hacia zonas de planicie aluvial.

*Planicie aluvial:* Conforman zonas donde eventualmente pueden ser inundadas por una crecida en un cauce o bien que reciben material de arrastre formando conos de deyección.

### **Desarrollo Histórico**

La CVM es una cuenca endorreica, conformada por los lagos de Texcoco, Chalco, Xochimilco, San Cristóbal (Tlatelolco) y Zumpango. Estos lagos fueron modificados desde el siglo XVIII por los aztecas y otras etnias que se asentaban en los lomeríos y partes altas de la cuenca, para evitar las inundaciones periódicas de los escurrimientos; realizaron algunas obras hidráulicas para paliar estos problemas, tal es el caso de la construcción del albarradón de Nezahualcóyotl, que evitaba la mezcla de aguas entre el lago de México y lago de Xochimilco en época de avenidas y servía como control de avenidas.

En época de la conquista el nivel de los lagos disminuyó debido al consumo de agua potable sobre los escurrimientos que los alimentaba por parte de poblaciones y la deforestación de la cuenca. A principios del siglo XX se concluyó la construcción del gran canal del desagüe que permitió desalojar las aguas de la

cuenca, en principal objetivo fue desalojar escurrimientos en época de avenidas para evitar inundaciones (UNAM, 2016).

La hidrografía en estos tiempos está compuesta por ríos que bajan de las serranías, que en general, a partir de los 2,400 msnm se entuban para ser dirigidos al drenaje de la ciudad, como el río de la Compañía y el río de los Remedios, el río de la Magdalena y el río de la Piedad; en las laderas del poniente la mancha urbana ha rebasado esta cota de infraestructura, modificando la cubierta del suelo. Es en esta región donde se presentan los escurrimientos torrenciales de la cuenca y cada vez son más recurrentes las inundaciones y encharcamientos.

### **Marco teórico**

Las actividades humanas provocan efectos en el medio ambiente, uno de los resultados más impactantes es el cambio de uso de suelo, cuya actividad primordial es la deforestación con el fin de ampliar territorios para usos habitacionales, agropecuarios, industriales y de extracción, modificando los procesos de lluvia-escurrimiento.

El uso de suelo se define como el potencial de explotación que presenta un espacio geográfico modificable en el que el hombre interviene de acuerdo a sus necesidades; comprende "las acciones, actividades e intervenciones que realizan las personas sobre un determinado tipo de superficie para producir, modificarla o mantenerla" (FAO, 1997a; FAO/UNEP, 1999). El uso del suelo abarca la gestión y modificación del medio ambiente natural para convertirlo con fin productivo o social a que se destina un terreno y las edificaciones o instalaciones que en él se realicen. De forma natural, los suelos tienen una Cobertura Vegetal, que es una capa de vegetación sobre la superficie terrestre, está comprendida por una amplia gama de biomasa y son las responsables de mantener el equilibrio ecológico (Geo-Institutos, 2017).

El uso del suelo se clasifica en categorías que definen su vocación productiva y la gestión de desarrollo que puede realizarse en un espacio geográfico determinado, tomando en cuenta el orden que se establece en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (DOF, 2011):

*Zonas de Conservación y aprovechamiento restringido o prohibido:* Estas zonas son determinadas por condiciones naturales específicas o por el estatus de protección que se les ha determinado.

*Áreas Naturales Protegidas:* se consideran aquellas áreas naturales sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo, las áreas de protección se definen:

Áreas localizadas arriba de los tres mil metros sobre el nivel del mar.

Terrenos con pendientes mayores al cien por ciento o cuarenta y cinco grados.

Áreas cubiertas con vegetaciones de manglar, bosque mesófilo de montaña, vegetación de galería y selvas altas perennifolias

*Zonas de Producción:* Estas zonas tienen condiciones de vegetación y suelo apropiados para la producción de madera y otros productos no maderables en forma sostenida y se dividen en:

Terrenos forestales de productividad alta, productividad media y baja. Terrenos con vegetación forestal de zonas áridas (huizachal); terrenos adecuados para realizar forestaciones o con algún grado de degradación (bajo-nulo). Terrenos con vocación forestal.

*Zonas de Restauración:* Son terrenos de aptitud forestal dedicados a otros usos o que están en proceso de degradación por incendios, plagas, y otros factores. Incluyen a los terrenos con riesgos de erosión evidente; se dividen en terrenos forestales con degradación alta, terrenos preferentemente forestales con degradación alta, terrenos forestales o preferentemente forestales con degradación media, terrenos forestales o preferentemente forestales con degradación baja, terrenos forestales o preferentemente forestales degradados que se encuentran sometidos a tratamientos de recuperación forestal.

La clasificación se basa en criterios eminentemente ambientales: cubierta vegetativa y potencial de erosión. Por Cobertura vegetal, se entiende como la proporción del suelo cubierto por vegetación distribuida en los 3 doseles: herbácea, arbustiva y arbórea, que se mide en porcentaje de cobertura, o en términos complementarios, de porcentaje de suelo desnudo.

De acuerdo a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 2017) en la sección 4 artículo 23 se establecen que es necesario el estudio de usos de suelo para evitar inestabilidad en el sistema ecológico, y con ello entender la relación que existe entre Urbanización y el medio natural, lo que pretende es prever las tendencias de crecimiento del asentamiento humano para mantener así un equilibrio entre la población y los recursos naturales. El concepto de cobertura y uso del suelo, son elementos importantes para comprender si el sistema se ha ido modificando en un periodo de tiempo muy corto (LGEEPA, 2017), a esta modificación se le denomina cambio de uso de suelo.

El Cambio de Uso de Suelo es el proceso en donde el hombre modifica el uso inicial, hacia otro uso potencialmente nocivo para el medio ambiente; el cambio modifica la dinámica del flujo del agua, disminuye la concentración de nutrientes y materia orgánica de los suelos e incrementa el arrastre de materiales y erosión (FAO, 2017). En consecuencia el concepto de cambio de uso de suelo se definirá como la razón de cambio, que en términos numéricos es la derivada de una función en un punto determinado, formalmente la derivada se define como:

$$f(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \text{ _____ [1]}$$

Cobertura vegetal se define como la función que depende de la parte meteorológica, social y uso de suelo para un espacio temporal y geográfico dados, por lo que se propone la siguiente función:

$$Uso\ del\ suelo = f(Meteorológica, Cobertura\ vegetal, Social) \text{ _____ [2]}$$

Aplicando la derivada con respecto al tiempo y espacio, se tiene el cambio en la cobertura, que es equiparable al cambio de uso de suelo, y que nos genera un sistema de dos variables:

$$\frac{dUS}{dxyt} = \left[ \frac{d(Meteorológica)}{dxy} + \frac{d(Sociedad)}{dxy} + \frac{d(Cobertura\ vegetal)}{dxy} \right] \left[ \frac{d(Meteorológica)}{dt} + \frac{d(Sociedad)}{dt} + \frac{d(Cobertura\ vegetal)}{dt} \right] \text{ _____ [3]}$$

Si se considera que los aspectos sociales son una constante y la derivada de una constante equivale a cero, el cambio de uso del suelo dependerá de los aspectos meteorológicos y de cobertura vegetal en espacio y tiempo:

$$\frac{dUS}{dxyt} = \left[ \frac{d(Meteorológica)}{dxy} + \frac{d(Cobertura\ vegetal)}{dxy} \right], \left[ \frac{d(Meteorológica)}{dt} + \frac{d(Cobertura\ vegetal)}{dt} \right] \text{ ————— [4]}$$

Finalmente, si el espacio geográfico de evaluación es el mismo a lo largo del tiempo, la función propuesta para evaluar el cambio de uso de suelo es a partir de la ecuación:

$$\frac{CUS}{dxyt} = \left[ \frac{d(Meteorológica)}{dxy} + \frac{d(Cobertura\ vegetal)}{dxy} \right] \text{ ————— [5]}$$

### **Justificación**

La mancha urbana en la CVM ha crecido exponencialmente en los últimos años, de acuerdo a los datos presentados en el cuaderno estadístico y geográfico de INEGI (INEGI, 2015). Alberga poco más de 23 millones de habitantes en el 2015 (Tabla 1); su crecimiento ha sido horizontal, invadiendo los terrenos aledaños a las zonas urbanas, que albergaban zonas agrícolas o de vegetación endémica, en el peor de los casos eran terrenos de suelos desnudos que permitían el amortiguamiento de los escurrimientos de la cuenca e infiltración.

La dinámica del cambio climático no depende exclusivamente de la fase atmosférica; una vez que los volúmenes de agua se transfieren de la atmosfera hacia la superficie del suelo, el ciclo hidrológico se ve afectado, si el espacio geográfico ha sufrido cambios de vegetación/suelo. Es así que la transferencia de agua entre lo atmosférico-terrestre cambia su velocidad, modificando los patrones de infiltración y escurrimiento, se altera la dinámica de recarga para el agua subterránea mientras y en lo superficial, se incrementa el lavado de nutrientes, deslave de tierras, erosión y sedimentación en cuerpos de agua, trasformando así el ecosistema, se incrementa la velocidad de acumulación, y con ello los picos de escurrimiento.

La pérdida de estos espacios de control hidrológico ha redundado en impactos económicos y sociales derivados de inundaciones, las que generan la pérdida del patrimonio económico de pobladores, infraestructura, vivienda y salud pública. Por lo anterior, en las grandes ciudades y en particular, la Ciudad de México, los impactos del cambio climático son mayores en extensión e intensidad, al presentar un mayor número de factores que aportan a la problemática: cambio de suelo y cambio de patrones hidrológicos.

### **Objetivo**

Los cambios en el uso del suelo de CVM en el transcurso del tiempo se han intentado cuantificar bajo diversos modelos numéricos y cualitativos; sin embargo, estos modelos de evaluación se han ido implementando de forma histórica para cubrir necesidades específicas de toma de decisión. Se ha percibido que el crecimiento de la mancha urbana ha afectado el funcionamiento ambiental de la

cuenca, pero los impactos no han sido evaluados de forma rigurosa por lo complejo del sistema. Uno de los efectos más evidentes son las inundaciones, cada vez más intensas y más recurrentes y con más pérdidas económicas y ambientales; desde hace 5 años aproximadamente se ha mencionado que esto es producto de *lluvias atípicas* en combinación con el taponamiento del sistema de drenaje, por basura. Sin embargo, no se han realizado evaluaciones rigurosas sobre el tema que permitan afirmar esto categóricamente.

Este trabajo relaciona las características del relieve terrestre con el crecimiento de la mancha urbana y los cambios de uso de suelo a partir del año 2000. El objetivo es identificar el vínculo entre los patrones de escurrimiento, y el uso del suelo.

### **Materiales y métodos**

El análisis realizado se hace a través del cambio de uso de suelo en imágenes satelitales Land Sat para los años 1992 y 2008 a través de Sistemas de Información Geográfica; la proyección terrestre es WGS84, en escala 1:250,000 para el año 2008, mientras que para el año 1992 es NAD27 en la misma escala. La comparación realizada es bajo la clasificación de INEGI, se centra en los suelos desnudos, cambio de la frontera agrícola y cambio de mancha urbana, así como sus patrones de distribución espacial. Respecto al análisis del relieve, este se hace a partir de la restitución altimétrica de las propias imágenes, con una calibración básica (1%) espacial, de la que se obtienen las curvas de nivel y el modelo de elevación terrestre. Las interpolaciones generadas por el sistema de información geográfica se colocaran en una matriz de comparación que permite visualizar los cambios presentados de forma física.

### **Resultados**

#### *Crecimiento poblacional*

Para determinar la tasa de crecimiento se partió de la información de los censos de población llevados a cabo por INEGI en los años 2000, 2005, 2010 y 2015, para la totalidad de la CVM. Tabla 1.

**Tabla 1. Población Total (2000-2015).**

<b>Año</b>	<b>Población (Millones hab)</b>
2000	19, 780, 920
2005	21, 021, 192
2010	22, 021, 192
2015	23, 437, 041

**Fuente: INEGI, 2015.**

Sin embargo en la zona oriente (ZO) de la CVM se define por el parteaguas trazado sobre la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Cerro de Chimalhuacán; abarca territorio de 11 municipios del Estado de México y una Delegación de la Ciudad de México; su crecimiento es mayor que al resto de la cuenca, es en esta zona donde se presentan las inundaciones de mayor incidencia-intensidad. El crecimiento poblacional de la zona oriente se presenta en la Tabla 2.

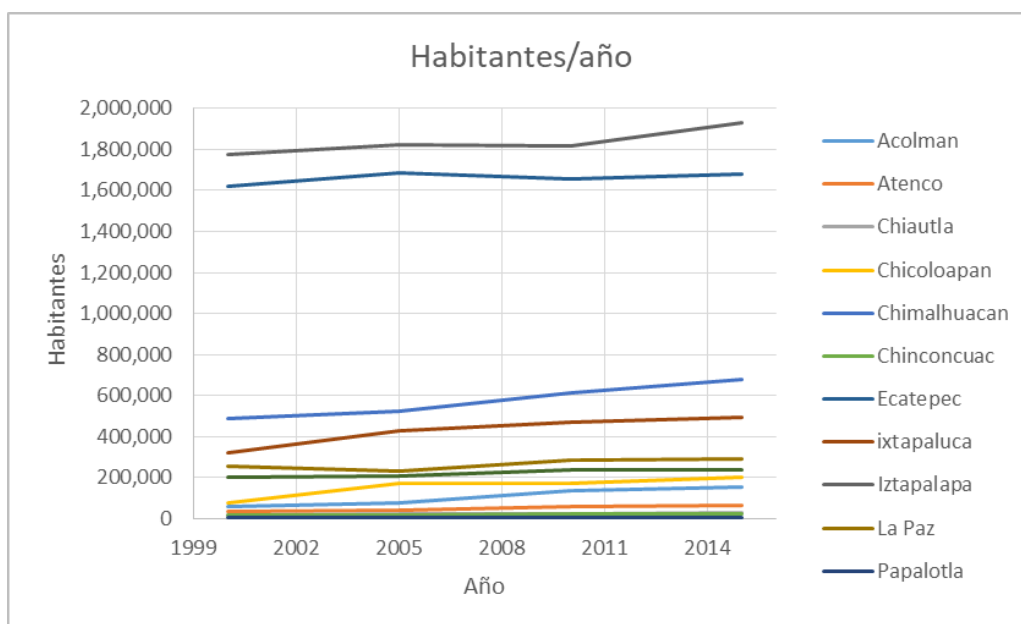


Tabla 2. Población 2000-2015 Zona oriente.

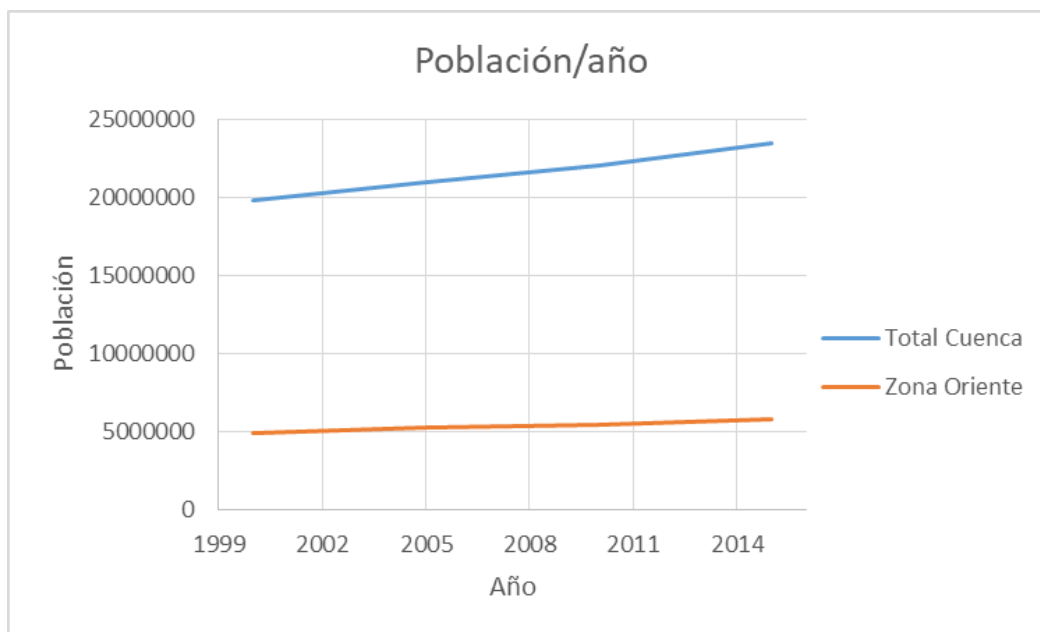
Municipio	No. Hab/año			
	2000	2005	2010	2015
Acolman	61, 250	77, 035	136, 558	152, 506
Atenco	34, 435	42, 739	56, 243	62, 392
Chiautla	19, 620	22, 664	26, 191	29, 159
Chicoloapan	77, 579	170, 035	175, 053	204, 107
Chimalhuacán	490, 772	525, 389	614, 453	679, 811
Chiconcuac	17, 972	19, 656	22, 819	25, 543
Ecatepec	1, 622, 697	1, 688, 258	1, 656, 107	1, 677, 678
Ixtapaluca	322, 271	429, 033	467, 361	495, 563
Iztapalapa	151, 294	1, 820, 888	1, 815, 786	1, 931, 136
La Paz	253, 845	232, 546	1, 110, 565	293, 725
Papalotla	3, 469	3, 766	4, 147	3, 872
Texcoco	204, 102	209, 308	235, 151	240, 749

Fuente: INEGI, 2015.

Las Gráficas 1a y 1b presentan el crecimiento de cada municipio, y el comparativo de la zona respecto la totalidad de CVM.



Gráfica 1a. Crecimiento poblacional, Zona Oriente



**Gráfica 1b. Crecimiento Poblacional CVM vs ZO**

Como se aprecia, la tendencia de crecimiento de los municipios de Chimalhuacán, Chicoloapan, Atenco, Ixtapaluca, Chimalhuacán y la Paz es mayor que los otros municipios; esta zona representa casi el 25% del crecimiento de toda CVM, y se ha mantenido así por 15 años.

**Tabla 3. Tasa de crecimiento poblacional.**

Año	Población	ZO	
	Millones/hab	Hab	%
2000	17,980,920	4,881,355	24.67
2005	21,021,192	5,241,317	24.93
2010	22,021,192	5,495,228	24.95
2015	23,437,041	5,796,241	24.73

### **Mancha Urbana**

El crecimiento poblacional se considera va aparejado con el crecimiento de la mancha urbana para el total de la cuenca y posterior, para la ZO exclusivamente; se realizó la comparación de imágenes satelitales, para los años 1992 y 2008, a partir de su clasificación (INEGI, cobertura vegetal/ uso de suelo), se determinaron las áreas por coberturas de suelo. La Tabla 4 presenta estos resultados de la comparación para el total de la cuenca; las Figuras 2a y 2b presentan las imágenes utilizadas.

Tabla 4. Cobertura Vegetal de la cuenca del Valle de México

Tipo de Cobertura	Área por cobertura (m <sup>2</sup> /Año)		
	1992	2008	%
Cuerpos de agua	72, 693, 900	154, 968, 300	113.18
Bosque de Pino-Encino	938, 087, 100	802, 167, 300	-14.49
Pastizales naturales	577, 252, 800	1, 887, 938, 100	227.06
Bosque pino	1, 527, 868, 800	971, 945, 100	-36.41
Nevado	30, 261, 600	30, 261, 100	0.00
Acahuales/Pastizales Inducidos	1, 391, 553, 918	3, 066, 038, 100	120.33
Agricultura	5, 207, 543, 100	1, 391, 919, 300	-73.27
Urbano/Pavimento	612, 650, 700	1, 272, 418, 200	107.69
Urbano/Pavimento*	3, 787, 200	226, 766, 700	5,887.71
Suelo desnudo	88, 925, 400	1, 298, 848, 500	1,360.60
Pradera	64, 913, 400		-100.00
Bosque de oyamel	587, 328, 300		-100.00

Fuente: Construcción propia con datos Landsat (1992, 2008).

\* Se refiere a Comunidades rurales

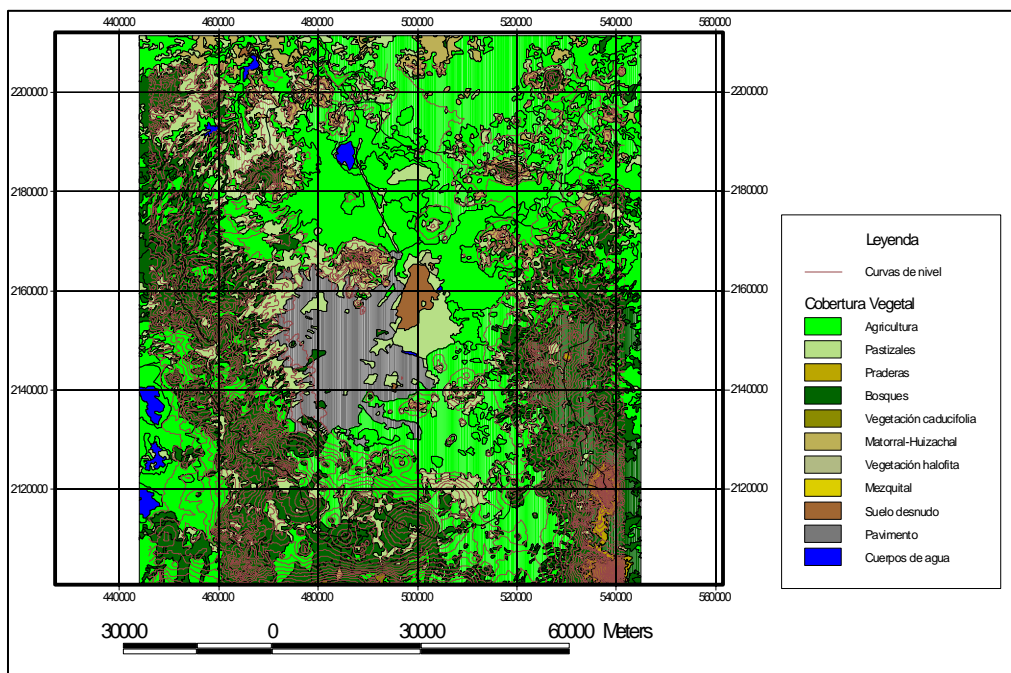


Figura 2a. Imagen Land Sat, 1992.

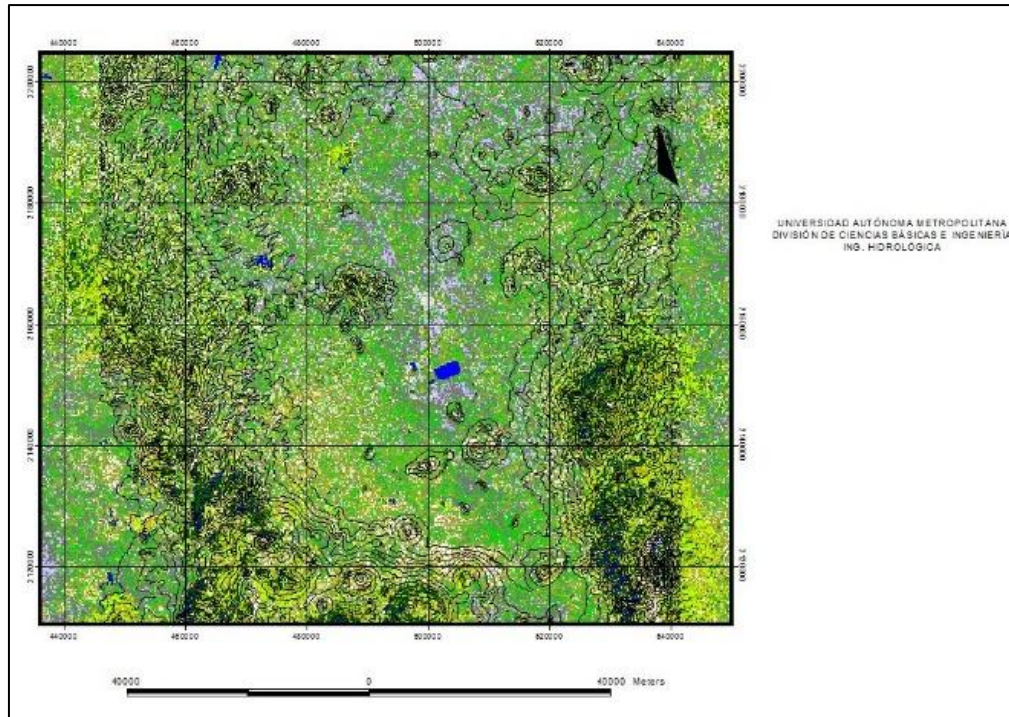
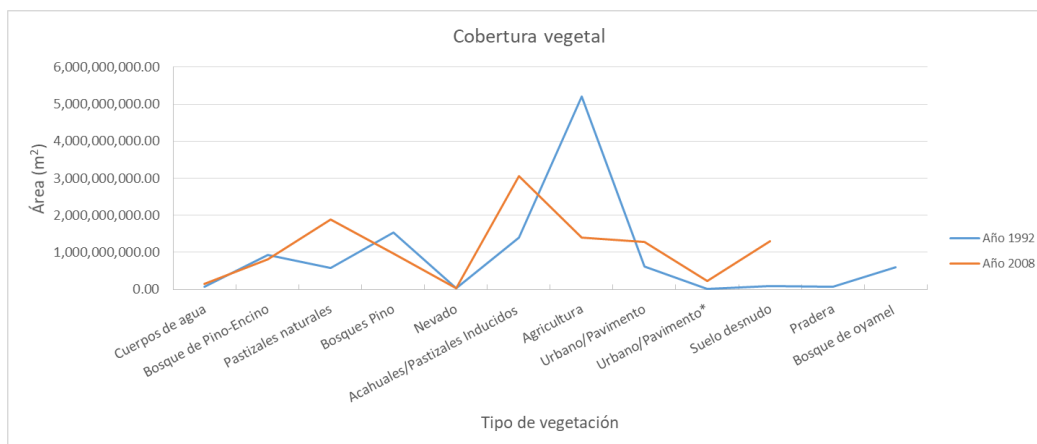


Figura 2b. Imagen Land Sat, 2008.

Comparando las extensiones por tipo de cobertura entre los años 1992 y 2008, es evidente que hay una pérdida de área de vegetación, sobre todo en el caso de la agricultura; mientras que hay una desaparición total de especies naturales que son las praderas y los bosques de oyamel. La Gráfica 2 presenta los cambios por tipo de vegetación, respecto del tiempo.



Gráfica 2. Comportamiento de las áreas por tipo de vegetación, respecto al tiempo.

Sin embargo, se definió que el cambio de uso del suelo es la diferencia de estas áreas, sobre un mismo espacio, pero en diferentes tiempos. Para realizar este cálculo se agregaron áreas bajo dos clasificaciones: vegetación endémica o natural y vegetación inducida y uso de suelo urbano; esta agregación se realiza bajo la lógica, de que las áreas perdidas por la vegetación natural, son adquiridas por los usos humanos. La Tabla 5 presenta este análisis.

**Tabla 5. Cambio de uso del suelo, CVM**

Vegetación endémica			Vegetación/Usos antropogénicos		
	Área (m <sup>2</sup> /año)			Área (m <sup>2</sup> /año)	
	1992	2008		1992	2008
Bosques	3, 053, 284, 200	1, 773, 662, 400	Agropecuario	6, 599, 097, 018	4, 457, 957, 400
Pastos	642, 166, 200	1,887,983,100	Urbano	616, 437, 900	1, 499, 184, 900
Total	3, 695, 450, 400	3, 661, 645, 500	Total	7, 215, 534, 918	5, 957, 142, 300

Se puede observar que hay una pérdida en los bosques, de 1, 279, 621, 800 m<sup>2</sup>, en contraparte, los pastos y acahuales se incrementan en 1, 245, 816, 900 m<sup>2</sup> que es aproximadamente la misma área. Esto significa que la proporción de vegetación endémica se ha mantenido casi constante, pero donde se ha perdido es en la *calidad de la cobertura*, al pasar de bosques a pastos y acahuales.

Respecto a los usos de suelo antropogénicos tenemos un escenario completamente opuesto: tenemos que los sistemas agropecuarios han tenido una pérdida de 2, 141, 139, 618 m<sup>2</sup>, mientras que los usos urbanos se han incrementado 882, 747, 000 m<sup>2</sup>; en este caso, al hacer el balance de transferencia de áreas tenemos que la pérdida de suelos agrícolas no pasa totalmente a los sistemas urbanos. Se observa que los suelos desnudos (deforestación) tiene un incremento de 1, 209, 923, 100 m<sup>2</sup>. Como calculo final, se suman las áreas que pasaron a sistemas urbanos, con los suelos deforestados, que da un total de 2, 092, 670, 100 m<sup>2</sup>, área muy similar a el área pérdida en los sistemas agropecuarios.

Analizando la ZO, tenemos que la vegetación endémica y agrícola desaparece totalmente, y el crecimiento de vivienda es muy bajo (6%), pero las áreas de calles, avenidas y suelos desnudos se disparan, así como terrenos sin vegetación. La Tabla 6 presenta los cambios de cobertura/uso del suelo.

**Tabla 6. Cobertura Vegetal ZO del Valle de México**

Tipo de Cobertura	Área por cobertura (m <sup>2</sup> /año)		
	Año de evaluación		%
	1992	2008	
Agrícola	52, 840, 115		-100.00
Pastizal	16, 628, 008		-100.00
Sin Vegetación	1, 708, 990	16, 995, 600	894.48
Asfalto-impermeable	1, 154, 723	17, 684, 100	1431.46
Urbano-construcción	36, 766, 374	38, 832, 300	5.62
Desnudo urbano	2, 124, 690	37, 710, 900	1674.89

En este punto es importante hacer notar que si bien el área de vivienda no crece de manera paralela a la población (25%), si lo hacen los espacios de *equipamiento urbano*. Otro elemento importante es el hecho de que los terrenos desnudos se incrementan en proporción 1: 17; esto se explica por el fenómeno de que al pasar grandes extensiones de uso agropecuario a urbano, las parcelas agrícolas que quedan inmersas en las zonas de desarrollo, por lo que son abandonadas.

#### *Modificación de los patrones de escurrimientos*

Para evaluar como el cambio del uso del suelo modifica la respuesta de escurrimientos, se realiza la estimación volumétrica de los escurrimientos, a partir de la simulación numérica de la relación lluvia escurrimiento bajo 4 condiciones hidrológicas:

*Condición I:* final del periodo de estiaje, por lo que los suelos se consideran completamente secos, y una lluvia baja, equivalente a 2 pulgadas de lámina de agua acumulada por evento; es representativo de un sistema deprimido hidrológicamente.

*Condición II:* inicio del periodo de avenidas, por lo que los suelos se consideran semi secos, y una lluvia alta, equivalente a 5 pulgadas de lámina de agua acumulada por evento; esto es representativo del establecimiento del periodo de lluvias.

*Condición III:* intermedio del periodo de avenidas, por lo que los suelos se consideran completamente saturados, y una lluvia baja, equivalente a 2 pulgadas de lámina de agua acumulada por evento; es representativo de la parte media de la época de avenidas (canícula) en la región.

*Condición IV:* final del periodo de avenidas, por lo que los suelos se consideran completamente saturados, y una lluvia alta, equivalente a 5 pulgadas de lámina de agua acumulada por evento; esto es representativo del final de la época de avenidas.

Estas 4 condiciones representan la secuencia de respuesta de la cuenca, conforme avanza el ciclo de lluvia; las simulaciones se hacen para los años referidos de comparación, donde se toman en cuenta las áreas con los usos de suelo, a nivel cuenca y la zona oriente, para estimar el cambio porcentual del escurrimiento. La Tabla 7 muestra los resultados de dichas evaluaciones.

**Tabla 7. Volumen de escurrimientos (m<sup>3</sup>) para las condiciones de evaluación y usos del suelo.**

Condición Hidrológica	Año de referencia				Incremento Q (%)	
	1992		2008			
	CVM	ZO	CVM	ZO	CVM	ZO
Condición I	263, 573, 805, 539	450, 428, 212	173, 298, 478, 382	626, 686, 850	-34.25	39.13
Condición II	532, 557, 596, 374	901, 386, 633	648, 416, 680, 452	1, 297, 781, 934	21.76	43.98
Condición III	1, 026, 882, 928, 728	28, 924, 616, 056	1, 178, 264, 504, 656	43, 135, 461, 748	14.74	49.13
Condición IV	1, 231, 215, 930, 915	72, 378, 807, 637	2, 883, 911, 975, 220	107, 939, 204, 918	134.23	49.13

Se observa que a nivel cuenca el comportamiento se polariza: para el final de la época de estiaje los escurrimientos desaparecen (-34%), mientras que para el inicio de la época de avenidas hay un incremento de 22%; bajo condiciones de saturación se incrementan hasta el 134%, lo que refleja cómo la pérdida de áreas con vegetación endémica y el incremento de la mancha urbana favorecen el incremento de picos de escurrimiento, como se ha mencionado párrafos arriba.

En contraparte, para el caso específico de la ZO, desde el incremento varía del 39 al 49%, que en principio es un valor menor al de la cuenca; sin embargo lo importante a resaltar en este caso, es que el incremento es alto desde la época de estiaje, es decir, que *para cualquier evento de lluvia genera picos de escurrimiento de tipo torrencial*.

#### Áreas de inundación

Para determinar las áreas que se inundan con los escurrimientos estimados, los volúmenes calculados para la condición IV se reflejan en el modelo altimétrico de la cuenca; para el año 1992 son 1, 231, 215, 930, 915 m<sup>3</sup>, para el año 2008 son 2, 883, 911, 975, 220 m<sup>3</sup>; de igual forma, se realiza para la ZO. Las Figuras 3a y 3b muestran las áreas inundadas para el total de la cuenca, y por año.

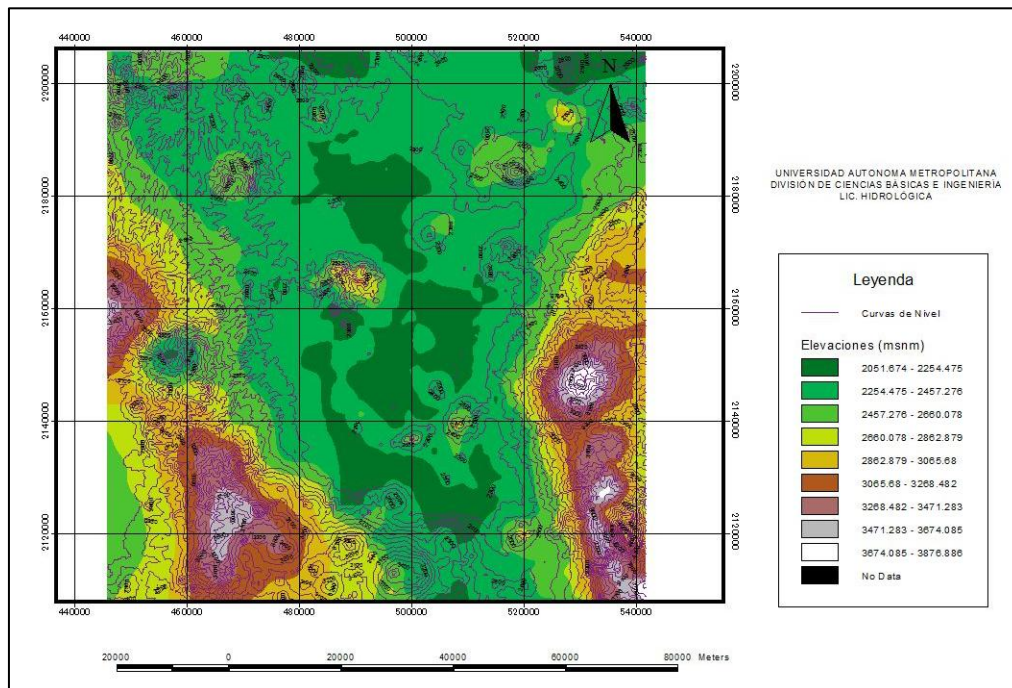
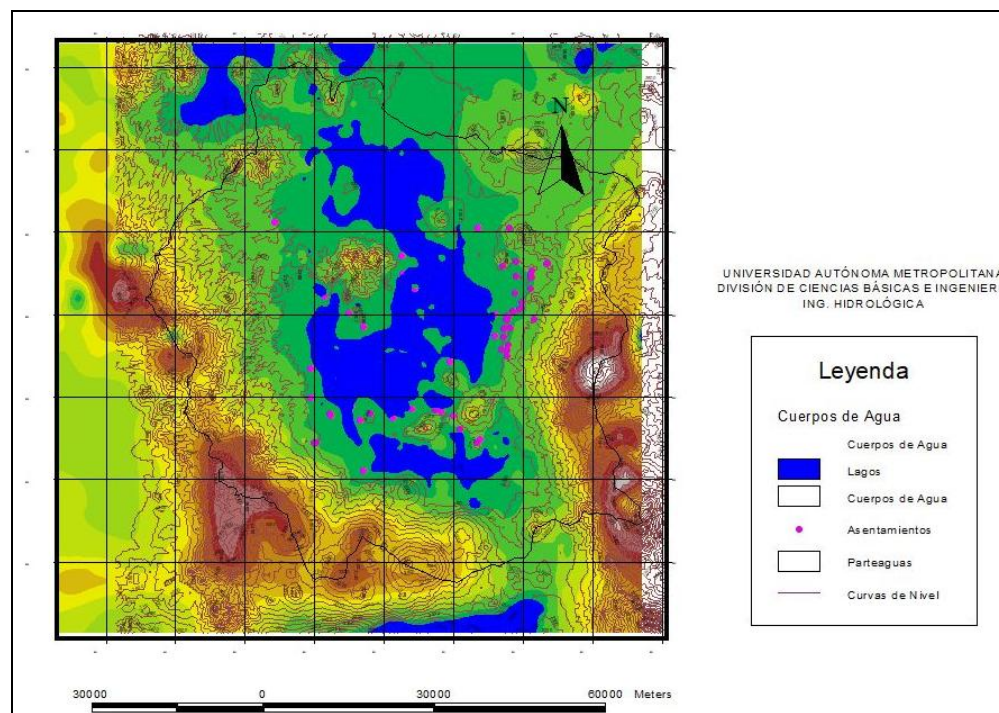


Figura 3a. Distribución de áreas inundables, condición de vegetación 1992.





**Figura 3b. Distribución de áreas inundables, condición de vegetación 2008.**

### Observaciones y discusión

El área de inundación para la condición de vegetación de 1992 abarca 330,467 m<sup>2</sup>; mientras que para el año 2008 es de 462 127 m<sup>2</sup>, equivalente a un incremento de 131 660 m<sup>2</sup> que respecto al área de la cuenca representa el 0.01%; esta misma extensión referida a los lechos lagunares representa el 39.84%.

Ahora bien, el impacto de los escurrimientos sobre la ZO se debe correlacionar con la distribución y crecimiento espacial de la mancha urbana y la forma en que se produce la acumulación de los escurrimientos estrictamente en la zona. Como se demostró en el cálculo de evolución poblacional, las mayores tasas de crecimiento se ubican sobre la región oriente de la cuenca (ZO); asimismo, es en esta pequeña porción de terreno que tenemos los cambios del uso del suelo más dinámicos de la cuenca, y los picos de escurrimientos más agresivos. Los escurrimientos en 1992 son de 72, 378, 809, 629 m<sup>3</sup>, y para 2008 son de 107, 914, 686, 766 m<sup>3</sup>, que a su vez se traducen en un área de inundación de 127, 102 m<sup>2</sup> y 317, 754 m<sup>2</sup> respectivamente; el incremento de área de inundación es de 190, 653 m<sup>2</sup>, porcentualmente 150%. La Tabla 9 muestra las relaciones entre uso del suelo, escurrimiento e inundación para la cuenca y la ZO.

**Tabla 9. Cambio de uso del suelo, área de inundación respecto a espacios geográficos.**

Zona	Cambio uso del suelo (%)	Incremento Q (%)	Incremento área de inundación (%)
Cuenca Valle Mex.	9.56	10.90	39.84
Zona Oriente	65.45	49.02	150.00



Como puede observarse, si se concentran los escurrimientos en la ZO, donde lo realmente importante es que se trata de una pequeña área, que se encuentra en la parte más baja de la cuenca sobre lechos lagunares compuestos por arcillas impermeables que no permiten la infiltración, es comprensible que esta zona presente las inundaciones más recurrentes.

Las áreas que más aportan al escurrimiento son los suelos desnudos: áreas sin vegetación (deforestación sin ninguna utilidad) y suelo desnudo-urbano, que son áreas que van siendo absorbidas en pequeñas porciones, dentro de las fronteras de la urbanización creciente, y que sin importar la condición hidrológica, su respuesta es 49% más agresiva a bajo cualquier condición hidrológica.

## **Conclusiones**

De acuerdo a la Land Uses Change Forestry, el cambio climatológico está asociado a los procesos bióticos y abióticos generando la necesidad de analizar por completo el sistema, debido a que la modificación del uso del suelo y la pérdida de áreas con vegetación modifican sustancialmente los patrones hidrológicos. Los factores que intervienen en la generación de escurrimientos son la lluvia en la fase atmosférica, y el manejo del suelo y relieve en la fase física del ecosistema.

La problemática del cambio climático se asocia ahora con las actividades desarrolladas por el hombre: el ser humano modifica su entorno para obtener satisfactores como agua, alimentos, vivienda y toda la gama de insumos necesarios para hacer su vida más cómoda. La pregunta es cuánto y donde se concentraran sus efectos, y de que magnitud e intensidad serán. Las evaluaciones tradicionales establecen tasas de deforestación, asociadas a grandes regiones de estudio, pero, por definición, las cuencas tienen un punto de acumulación, ya sea la salida o la parte más baja, como en el Valle de México.

Por todo lo anterior, en la Ciudad de México el cambio climático es un fenómeno que si bien abarca lo atmosférico, es más importante la fracción asociada al uso y cambio de suelos; pero es aún más importante el análisis de cómo se mueve el agua y donde se acumula.

En la CVM las asociaciones vegetativas endémicas se mantienen constantes asegurando un cierto equilibrio en esta fase, aunque se debe mencionar que hay una baja en la calidad de la vegetación, ya que se pasa de asociaciones de alta densidad y mixtas (bosques de tres doseles) a sistemas como pastos y acahuales que son de menor calidad/densidad. Respecto a las áreas productivas (zonas agrícolas y agropecuarias) es donde se presenta la mayor tasa de deforestación, aunque la velocidad de ocupación de estas tierras es mucho menor que la velocidad de deforestación, pero la ausencia de cobertura vegetal impacta en los escurrimientos.

La ciudad es un activo social y económico compuesto por infraestructura urbana, sistemas productivos como industria, telecomunicaciones y energía; sistemas sociales de vivienda, educación, atención a la salud, etc., cuya edificación, conservación y operación recae totalmente en las entidades de gobierno. Cada vez que se presenta una inundación, se produce una pérdida económica para las entidades de gobierno y por su parte, el poblador también enfrenta estas pérdidas en su patrimonio de vivienda y enseres domésticos y en otros ámbitos como la pérdida de horas laborables. En un segundo nivel de incidencia se dan los impactos de segundo grado o plazo medio: estos son a la salud, como riesgo sanitario, contaminación de fuentes de abastecimiento de agua e infraestructura de conducción y desalojo de aguas negras.

Al ser la ZO la más baja de toda la cuenca, los escurrimientos se concentran en ella, entonces el impacto adquiere otra dimensión: los espacios de acumulación son más pequeños, que asociados al incremento

de los escurrimientos, producen la combinación de 3 condiciones adversas: el cambio de uso del suelo que se traduce en una respuesta de la relación lluvia-escurrimiento muy agresiva, y un el ser un punto de acumulación de escurrimientos, el área de inundación se incrementa mucho más; en números representa un incremento del 49% del volumen de escurrimiento, que se traduce en incremento del 150% de área de inundación, esto es la relación escurrimiento-acumulación es 1:4.

En los últimos años, las inundaciones en la Zona Oriente no solo son recurrentes, sino que se han incrementado en intensidad, de tal forma que ahora hasta los eventos de pequeña magnitud provocan severos encharcamientos, mientras que los eventos mayores provocan inundaciones. Estos eventos que inicialmente se consideraban esporádicos han tomado una temporalidad que se acerca mucho a la normalidad, lo que ha obligado a los responsables a desarrollar planes de reacción llamados *emergentes*, cuando en realidad son planes de atención ordinaria.

Como elemento final de tensión se tiene que las tasas de crecimiento poblacional de la zona presentan un crecimiento 5 veces mayor que en el resto de la CVM (25%), pero no se puede asociar a las tasas de denudación de suelos; esto se explica por abandono de terrenos en sistemas agropecuarios, al quedar inmersos los terrenos en áreas de urbanización (fragmentación del espacio).

Las evaluaciones sobre los procesos de urbanización y cambios en el uso del suelo son fundamentales para entender los modelos locales de expansión de los asentamientos humanos, y cómo estos modelos se dirigen hacia los procesos metropolizantes, gentrificantes o de ruralización. La pregunta es, ¿Cómo enfrentar estos supuestos eventos esporádicos que impactan a los sistemas urbanos? La respuesta es a través de análisis que integren la complejidad necesaria para atacar alguno o más de los factores que los generan con la finalidad de dar directrices a las acciones de la sociedad civil o las estrategias de política pública que deriven en un crecimiento ordenado de las regiones, y que pueden ir desde una escala micro hasta una meso escala.

## REFERENCIAS

- Cámara de Diputados.** (2017). *Política ambiental*. 2017, LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente) Sitio web: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148\\_240117.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_240117.pdf)
- CCVM** (Conejo de Cuencas del Valle de México). (2014). *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía*. 2017, de CONAGUA Sitio web: [http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/IMTA\\_CONAGUA%20cuenca%20V alle%20de%20M%C3%A9xico%20salida%20.pdf](http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/IMTA_CONAGUA%20cuenca%20V alle%20de%20M%C3%A9xico%20salida%20.pdf)
- Cano J. C.** 2011. El rescate de los lagos. Letras Libres. México, vol. No. 153. 10 septiembre. <http://www.letraslibres.com/sites/default/files/files6/files/0153-convivio03-m.pdfChow>
- CINU.** (17 de 10 de 2009). Naciones Unidas y El Cambio Climático. Recuperado el 2 de 05 de 2017, de Cambio Climático: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Diario Oficial de la Federación.** 2011. Acuerdo por el que se Integra y organiza la Zonificación Forestal. 30 de Noviembre de 2011. <https://app.vlex.com/#vid/334962226>
- Ecología, S. D.** (2007). Diagnóstico Ambiental. *Región VII Texcoco*, 50.
- Economista.** (2017). *El Economista*. Recuperado el 2017, 15 de Julio de <http://eleconomista.com.mx/entretenimiento/2015/04/21/madre-tierra-pierde-sus-arboles-manera-acelerada>
- FAO,** 1997a; FAO/UNEP, 1999. [http://www.grida.no/climate/ipcc/land\\_use/045.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc/land_use/045.htm)
- FAO.** (2017). *Depósito de Documentos de la FAO*. Recuperado el 2017, de Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S06.htm>
- Fernández E., A., F. Uribe, I. Ramírez, B. Apolinar y A. Vázquez.** 2002. Evaluación del avance de la mancha urbana sobre el área natural protegida de la cañada de los Dinámos. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. Gaceta Ecológica. No. 62. México, D. F. México. pp. 56-67.
- Geo-Institutos.** (2017). *Artículos*. Recuperado el 2017, de [http://www.geoinstitutos.com/art\\_03\\_cober2.asp](http://www.geoinstitutos.com/art_03_cober2.asp)
- GFW.** (2013). *Global Forest Watch*. Recuperado el 2017, de Tree Cover Loss (2001-2013): [http://www.globalforestwatch.org/map/3/27.27/-111.87/MEX/grayscale/loss?tab=analysis-tab&begin=2013-01-01&end=2014-01-01&threshold=30&dont\\_analyze=true](http://www.globalforestwatch.org/map/3/27.27/-111.87/MEX/grayscale/loss?tab=analysis-tab&begin=2013-01-01&end=2014-01-01&threshold=30&dont_analyze=true)
- INEGI.** (2015). *Censos de Población y Vivienda*. Recuperado el 2017, de <http://www3.inegi.org.mx/rnm/index.pP/catalog/Censos>
- LULUCF.** (Septiembre de 2009). *UNFCCC*. Recuperado el 2017, de Informal Data Submission: [https://unfccc.int/files/kyoto\\_protocol/application/pdf/australialulucf300909.pdf](https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/australialulucf300909.pdf)
- UNAM, D. G.** (2016). *Historia Hidrológica de la Cuenca de México*. Recuperado el 2017, de <http://www.fundacionunam.org.mx/ecopuma/la-unam-te-explica-la-historia-hidrologica-de-la-cuenca-de-mexico>